

高层建筑箱形与筏形 基础的设计计算

钱力航 主编

1

中国建筑工业出版社

高层建筑箱形与筏形 基础的设计计算

钱力航 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高层建筑箱形与筏形基础的设计计算/钱力航主编.

北京: 中国建筑工业出版社, 2003

ISBN 7-112-05594-6

I. 高… II. 钱… III. ①高层建筑—箱形基础—
计算方法②高层建筑—筏形基础—计算方法
IV. TU471.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 103430 号

本书根据《高层建筑箱形与筏形基础技术规范》(JGJ 6—99) 和《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002) 编写。主要包括以下内容: 总论; 地基勘察; 地基计算; 箱形基础的结构设计; 筏形基础设计; 桩箱与桩筏基础; 高层建筑大底盘框架厚筏基础; 地基的力学模型与基础梁板的数值分析; 地基反力; 上部结构与地基基础的共同作用。

本书可供土木、岩土、水利、交通、港口类工程技术人员和高校师生参考使用。

* * *

责任编辑 咸大庆 郭 栋

高层建筑箱形与筏形基础的设计计算

钱力航 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 24 插页: 1 字数: 580 千字

2003 年 6 月第一版 2003 年 6 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 30.00 元

ISBN 7-112-05594-6

TU·4914 (11212)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.china-abp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

前 言

箱形基础、筏形基础以及桩箱、桩筏基础是我国高层建筑的主要基础形式之一。20世纪70年代,中国建筑科学研究院,北京市建筑设计研究院、北京市勘察设计院、北京工业大学、上海市民用建筑设计研究院、同济大学、上海市政工程设计研究所和华东建筑设计院等单位共同开始对高层建筑箱形基础进行现场实测和理论研究。几十年来,参与研究的单位和人员越来越多,涉及的面越来越广,研究的深度越来越深,取得了丰硕的成果。并发表了大量的论文和专著,从不同的侧面对这种基础形式进行阐述。随着我国高层建筑的迅速发展,箱形、筏形基础得到了大量的应用,取得了非常丰富的实践经验。在总结研究成果和设计施工经验的基础上,1980年原国家建工总局颁布了高层建筑基础领域第一部部颁标准《高层建筑箱形基础设计与施工规程》(JGJ 6—80),1999年又颁布了强制性行业标准《高层建筑箱形与筏形基础技术规范》(JGJ 6—99),用以规范和指导高层建筑箱形、筏形基础的设计与施工。

本书的编著人员都是《高层建筑箱形与筏形基础技术规范》(JGJ 6—99)的主要参编人员,或长期从事箱形、筏形基础的勘察、设计和科研人员。因此本书的内容与《高层建筑箱形与筏形基础技术规范》(JGJ 6—99)是紧密结合的。编者期望规范的内容在书中得到充分的阐述,又为规范提供背景材料和必要的补充,便于读者准确理解和应用规范。但是本书的内容更加丰富。在充分反映20世纪70年代以来我国科研、设计单位和高等学校在箱、筏基础方面取得的研究成果和设计经验的同时,还介绍了国内外的一些传统、经典的设计计算方法。使读者对箱形、筏形基础的设计计算理论有更全面的了解。

本书在编写时注意吸收和引用现场实测和室内试验资料,这些试验大多是作者亲自参与的,数据真实、可靠。

本书是集体劳动的成果,各章节的内容和编写人员如下:

第1章——钱力航;

第2章——北京市勘察设计院袁炳麟研究员;

第3章——中国兵器工业勘察设计院章家驹研究员;

第4章——北京市建筑设计研究院侯光瑜教授级高级工程师;

第5章——中国建筑科学研究院彭安宁高级工程师;

第6章——中国建筑科学研究院黄强研究员;

第7章——中国建筑科学研究院宫剑飞博士;

第8章——宫剑飞;

第9章——中国建筑科学研究院谭永坚高级工程师;

第10章——钱力航。其中第五节由中国建筑科学研究院白永宏硕士编写。

在本书完成之际,我们特别怀念曾与我们共同进行研究工作的、已经去世的何颐华、叶于政、张问清先生,特别感谢张国霞、方寿生、赵锡宏、许惟阳、孙家乐、曹名葆、王

引生、黄绍铭、方世敏、陈皓彬、张乃瑞、王素琼、苏立仁、马达成、陈坚峰、张耀廷等诸位先生，感谢他们在我国箱形、筏形基础的研究中作出的贡献。

最后要说明的是，在本书即将完稿之际，《建筑地基基础设计规范》（GB 50007—2002）等一批新的国家标准颁布了，编者根据新规范又相应作了一些调整。但因时间仓促，难免有不协调之处，敬请读者见谅。也限于编著者的水平，本书错漏不当之处在所难免，诚望读者和同行专家不吝指正。

钱力航

中国建筑科学研究院

目 录

第 1 章 总论	1
第一节 箱形基础与筏形基础的定义、特点和应用条件	1
第二节 设计计算方法综述	5
第三节 尚需深入研究的一些问题	15
第 2 章 地基勘察	18
第一节 概述	18
第二节 勘察设计	20
第三节 勘察报告的主要内容	25
第四节 地基检验	35
第五节 现场监测	36
第 3 章 地基计算	38
第一节 地基承载力	38
第二节 地基稳定性验算	46
第三节 基坑底部回弹变形	49
第四节 地基变形计算	57
第五节 高层建筑箱形与筏形基础的容许变形	70
第 4 章 箱形基础的结构设计	85
第一节 箱形基础几何尺寸的确定	85
第二节 箱形基础的内力分析	91
第三节 箱形基础构件截面计算和设计	104
第四节 箱形基础一般构造要求	112
第五节 高层建筑箱、筏基础结构抗震设计中的几个问题	113
第 5 章 筏形基础设计	119
第一节 概述	119
第二节 内力计算	130
第三节 筏形基础室内模型试验	138
第四节 构造要求	146
第五节 工程实例	151
第 6 章 桩箱与桩筏基础	159
第一节 概述	159
第二节 按承载力控制设计布桩	159
第三节 按变形控制设计布桩	164
第四节 承台土分担荷载	165
第五节 桩筏(箱)结构计算	172
第六节 底板局部受力计算	179
第七节 沉降计算	182

第 7 章 高层建筑大底盘框架厚筏基础	186
第一节 概述	186
第二节 室内模型试验研究	188
第三节 大底盘框架厚筏基础的数值计算方法	195
第四节 大底盘框架厚筏基础的工程特性	201
第五节 结论	207
第 8 章 地基的力学模型与基础梁板的数值分析	209
第一节 地基的力学模型	209
第二节 线性弹性地基模型	209
第三节 非线性弹性地基模型	216
第四节 弹塑性地基模型	220
第五节 地基上梁的数值分析	226
第六节 地基上板的数值分析	239
第 9 章 地基反力	261
第一节 地基反力确定的一般方法	261
第二节 地基反力的试验研究	268
第三节 地基反力系数表的确定	317
第四节 地基反力系数表的应用	332
第 10 章 上部结构与地基基础的共同作用	338
第一节 共同作用的概念	338
第二节 上部结构的贡献	339
第三节 箱形基础共同作用的简化分析	344
第四节 共同作用的子结构分析法	353
第五节 刚度修正系数及其应用	355
附录	363
参考文献	371

第 1 章 总 论

第一节 箱形基础与筏形基础的定义、特点和应用条件

一、定义

箱形基础、筏形基础以及桩箱、桩筏基础是我国高层建筑几种常用的基础形式。

顾名思义，箱形基础就是形状如箱子的基础，筏形基础就是形状如筏的基础。1999年，建设部颁布了我国行业标准《高层建筑箱形与筏形基础技术规范》(JGJ 6—99)，其中对箱形和筏形基础做出了科学的定义。规范中的定义与规范中关于箱形和筏形基础的设计计算方法的规定是一致的。本书以后各章论述的箱形基础、筏形基础以及桩箱、桩筏基础也是基于规范的科学定义的。

1. 箱形基础 (Box Foundation)

箱形基础是由底板、顶板、侧墙及一定数量内隔墙构成的整体刚度较好的单层或多层钢筋混凝土基础。

由于现有的一些计算刚度的公式都难以准确反映箱形基础整体刚度的大小，所以当箱形基础的几何尺寸、洞口设置以及混凝土强度符合《高层建筑箱形与筏形基础技术规范》(JGJ 6—99)的有关规定时，即可认为其“整体刚度较好”了。例如箱形基础的高度不宜小于其长度的 $1/20$ ，并不小于 3m ；内墙、外墙、底板的厚度分别不小于 200mm 、 250mm 、 300mm ；墙体水平截面总面积不小于外墙外包尺寸的水平投影面积的 $1/10$ ；混凝土强度等级不应低于 C20 等等。工程实测资料表明，符合这些规定的、整体刚度较好的箱形基础的相对挠曲值很小。在软土地区一般小于万分之三；在一般第四纪粘性土地区小于万分之一。

2. 筏形基础 (Raft Foundation)

筏形基础是指柱下或墙下连续的平板式或梁板式钢筋混凝土基础。

平板式筏形基础为置于地基上的等厚度钢筋混凝土平板，梁板式筏形基础是带肋梁的钢筋混凝土板。肋梁可沿柱网纵横布置，也可根据结构需要单向平行布置。肋梁可以向上布置在板面以上，也可以向下嵌入地基。

3. 桩箱与桩筏基础

桩箱与桩筏基础就是置于桩上的箱形基础或筏形基础。

桩箱与桩筏基础的受力与变形状态既不同于天然地基上的箱形基础和筏形基础，也不同于单纯的桩基础，它是由箱形或筏形基础与桩以及地基土三者组成的、相互作用的一个受力共同体，共同承受上部结构传来的各种荷载。因此其设计计算也更为复杂。

二、特点

箱形和筏形基础能够成为高层建筑常用的基础形式，是因为它们具有如下一些特

点^[3]：

1. 能充分发挥地基承载力

因为箱形和筏形基础都是满堂基础，与独立柱基、条形基础或十字交叉梁基础等相比，基础的底面积比较大，有利于充分作用地基的承载力。而且箱形和筏形基础都要求有一定的埋置深度，一般埋深都在5m左右或者更深，有的甚至达到20m以上。基础埋置越深，地基承载力的利用就越充分。在现有的各种地基承载力公式中均明确地表达了基础埋置深度与地基极限承载力的关系。例如太沙基承载力公式为：

$$p_u = cN_c + \gamma dN_q + \frac{1}{2} \gamma b N_\gamma \quad (1-1)$$

式中 p_u ——地基极限承载力 (kPa)；

c ——土的粘聚力 (kPa)；

γ ——土的重度 (kN/m³)；

b 、 d ——基础底宽度、埋置深度 (m)；

N_c 、 N_q 、 N_γ ——无量纲的承载力系数，仅与土的内摩擦角 φ 有关。

显而易见极限承载力 p_u 是随着埋置深度 d 的增加而增加的。在我国现行的《建筑地基基础设计规范》中明确规定了地基承载力按基础宽度和埋置深度进行修正的公式，这对箱形、筏形基础充分利用地基承载力的特点也是很好的佐证。

另外，近代土力学的研究已从理论和试验上证明，土的天然强度随深度呈直线变化的规律。图 1-1 是上海软土的天然强度随深度变化的统计曲线^[4]。从中可以看出，各层土强度分布曲线中与深度具有良好的线性关系。虚线为原位十字板强度，在深度为 10m 处的土层因夹有薄层粉砂，所以强度明显偏高。英国伦敦粘土的三轴、荷载板和旁压仪试验的结果也表明，其天然强度与深度之间的关系也具有明显的线性趋势。

2. 基础沉降量比较小，调整地基不均匀沉降的能力比较强

同样由于作为高层建筑的基础，箱形、筏形基础的埋置深度比较大，基础本身所占的体积很大，挖去的土方重量往往大于箱形和筏形基础本身的重量，使之成为一种补偿基础，相应的基底附加压力值也会减小。所以在同样的上部结构荷载的情况下，箱形和筏形基础沉降量会比其他类型天然地基上的基础小。

箱形基础和带地下室的筏形基础都是整体性很好的基础，具有较大的整体刚度。特别是箱形基础可以认为是一种刚性基础。它们都处于整体受力的状态。所以当上部结构荷载有些偏心或地基土质略有不均匀的时候，箱形和筏形基础都可以起到调整不均匀沉降的作

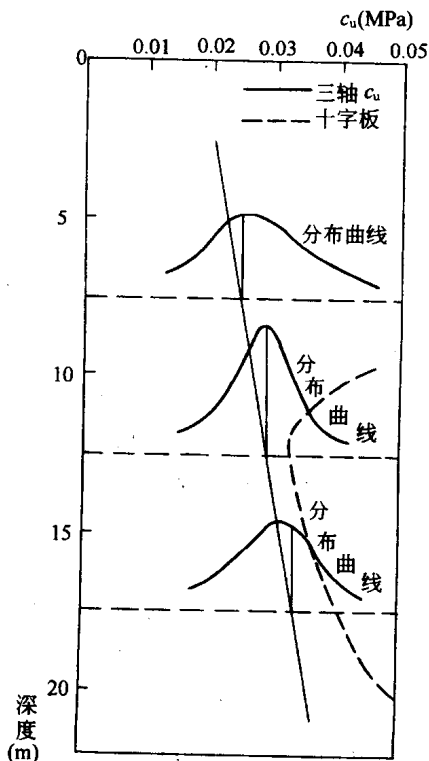


图 1-1 上海软土天然强度随深度变化的关系曲线

用。而一些刚度不大的非整体基础，包括不带地下室的、厚度不大的筏形基础，这种调整能力就比较差。

3. 具有良好的抗震能力

地震灾害的宏观调查资料表明，箱形基础的抗震性能很好，它不仅沉降小，而且在发生较小的地裂或轻度地基液化时，也能保持其整体性，不致出现严重问题。例如在天津软土地区有一地磅房，地面下为钢筋混凝土地沟，其刚度还不如箱形基础。1976年唐山大地震时，该地的地震烈度为8度，附近地基严重液化，发生多道地裂，但地磅房基本完好，地裂缝沿磅房侧墙绕过。

筏形基础在唐山大地震中也表现出良好的抗震性能。无论多层房屋、大型构筑物或者高烟囱的筏形基础，在地震烈度为8~10度的地区，都被证明是好的基础形式。对于纵横墙交叉、内隔墙较多的地下室，抗震性能都很好。这是因为震动土压力可经内墙传递到相对一面的土体上。而空旷的地下室，或只有纵墙而无横隔墙支撑时，则抗震能力较差，特别是当土质较软或遇有可液化土层时，由于震动土压力过大而造成外墙内移，甚至弯曲。

唐山大地震中桩基的震害主要表现在桥墩、码头等高桩承台的结构物中，用在房屋、烟囱、水塔下的桩基础基本上没有震害。在软弱地基中采用桩基时，地震引起的沉降很小。在可液化的地基中采用桩基能显著地减轻液化引起的震害。所有设计时未考虑地震作用的桩基经过8~10度地震的考验而没有发现问题。笔者在考察1970年1月的云南通海地震震害时也发现，通海杞麓湖边的一座采用桩基的泵站经受住了9度地震的考验。显然，桩箱、桩筏基础的抗震性能好，更是毋庸置疑的。

4. 可以充分利用地下空间

随着城市建设的现代化，地下空间的利用显得越来越重要。地下停车场、地铁车站、地下商业设施以及防空袭设施，所需要的面积和空间都非常大。例如日本的许多城市地下交通四通八达、地下车站星罗棋布。许多高层建筑的地下，既是地铁车站，又是地下商场。筏形基础对于这类高层建筑是特别合适的。而箱形基础由于内隔墙较多，用作地下停车场和地铁车站就比较困难。但若是多层地下室，最下面一层为箱形基础，上面几层仍按上部结构的柱网布置，也不会影响地下空间的有效利用。箱形基础作为防空地下室，由于其整体性好，优势更为明显，在保持城市防空地下室总面积不变的前提下，合理布置防空地下室的位置，使防空地下室与高层建筑的箱形或筏形基础结合起来，即可大大节约基础的造价。如果与地铁车站相结合，同样可以节省城市建设的总费用。

5. 施工方便

天然地基上的箱形基础和筏形基础施工比较方便。当地下水位较低时，甚至可以利用我国劳动力充足、价格便宜的特点，进行人工开挖基坑，无须采用机械，亦即受到设备的限制相对较少。当然对于地下水位较高、相邻建筑密集、施工场地狭小的状况，就会出现人工降低地下水位及基坑支护等复杂的问题，施工也就不见得方便了。桩箱、桩筏基础更应另当别论了。

6. 在一定条件下是经济的

对一般高层建筑而言，基础工程的造价约占其总造价的10%~20%，基础工程的工期约总工期的25%~48%，但是影响基础工程造价和工期的因素很多，就天然地基上的

箱形和筏形基础来说,是否需要人工降低地下水位、是否需要进行基坑支护、土方运距的长短等都是非常重要的因素。

曾经对一些工程进行过方案比较,仅就造价而言,长桩加箱形基础是最贵的。短桩加箱形基础大致相当于扩大的箱形基础。对灌注桩基础和箱形基础则要根据具体条件进行比较。例如北京某高层建筑,要求地下室埋深为3m,基底面积为 1071m^2 。方案一采用直径为400mm、长度为10m的灌注桩,承台断面为 $600\text{mm}\times 600\text{mm}$,单桩承载力为500kN。方案二为箱形基础,设3m、4m、5m三种埋深,底板厚度均为0.5m。预算包括从平整场地开始到基坑回填土完成。基坑开挖按基底四周加宽2m、放坡按1:0.5考虑。采用机械挖土、土方运距为11km。以3m埋深箱形基础每平方米的综合造价为100%,则5m箱基为138%,4m箱基为119%,灌注桩为117%。

上海也作过统计分析,对于一般高层住宅,桩基础比箱形基础可节约造价40%~70%。钢筋用量可节约50%,混凝土用量大致相当。箱形基础的费用主要高在人工降低地下水位和基坑围护的费用,前者占基础总造价的5%~12%,后者则占16%~33%。这样比较的前提是地下室可有可无。如果必须建地下室,则采用箱形基础反而可节约造价26%。

三、应用条件

高层建筑与一般建筑一样,往往可以采用多种基础方案。但是从诸多方案中选择技术上先进、可靠,经济上合理的最优方案,却要考虑许多因素。所以是否采用箱形和筏形基础,应是多种基础方案进行比较的结果。影响方案选择的因素主要有:

1. 上部结构特性

上部结构形式不同,对基础的要求也不同。对地基不均匀沉降非常敏感的结构,需选择整体刚度大、调整不均匀沉降能力强的基础,例如箱形基础和筏形基础。

2. 地基土质条件

当土质较好、地基承载力较高时,首先应考虑天然地基方案,例如北京的高层建筑,天然地基上的箱基应用较多。上海的地质特点是软土层厚度大,承载力低,对于高度在40m以下的建筑,采用埋深不大于6m的箱基是可行的。对于更高的建筑,天然地基承载力就难以满足,如加大基础埋深,一级轻型井点降水设备就不能适用,深基坑开挖会带来降水和边坡支护等一系列难题。广州的特点是地质条件复杂,软土层厚薄不一,基础埋深变化很大,所以高层建筑大多采用桩基。

3. 建筑功能要求

有些建筑有人防、地下车库和设备层的要求,如地质条件许可,采用箱基或筏基则一举两得,既满足了使用要求,又满足了基础的技术要求。

4. 抗震要求

在抗震设防区,抗震要求是选择基础方案的必须考虑的因素。箱基、筏基和桩基、桩筏基础的抗震性能比较好,可供高重建筑物选用。

5. 材料及施工条件

从钢材、水泥、木材三大材料来看,箱基和筏基的用量较大。预制桩次之。灌注桩不用木材,钢筋用量也较少,但水泥用量大。基础方案必须考虑材料的供应情况。施工条件主要是指施工机具设备、施工技术和经验等。

6. 工程环境

工程所在地区的环境可能影响基础方案。在城市中心或某些特殊地区,不允许发生噪声和振动,就不能考虑预制桩方案。有些地区泥浆无法排放,就不能采用灌注桩基础。工程环境还包括对相邻建筑物的影响,如打桩造成附近建筑物的隆起、降水引起邻近建筑物的下沉等,在确定基础方案时均应考虑。

7. 基础造价

不同形式的基础造价固然不同,相同形式的基础造价也不一定相同。如前所述,同样是箱形或筏形基础,土方运距不同,造价相差很大。

8. 工期

对于某些工程,工期可能成为决定性的因素,因为缩短工期带来的经济效益和社会效益可能是最大的。

另外,地区性的习惯做法,也会影响基础形式的选择。例如深圳市 1996 年 6 月 30 日前竣工和在建的 18 层以上的高层建筑工程总计 430 项,753 幢^[6],其中采用各种形式的桩基为 403 项,筏形基础为 15 项,箱形基础为 2 项,桩箱或桩筏基础为 8 项。出现这样的比例,就不仅仅是以技术经济条件衡量的结果了。

第二节 设计计算方法综述

箱形和筏形基础的设计计算方法是与建筑工程的需要相适应的,是随着建筑科学研究的深入而进步的。当建筑工程处于层数很少、体量很小、重量很轻的阶段时,对地基基础的要求不高,计算方法也很简单。后来建筑物的层数增加了,重量大了,整体式的筏形和箱形基础就相应出现了,因为单靠条形基础、独立基础是无法满足建筑物的承重要求了。而且人们在修建铁路、码头、船坞的过程中,逐渐认识到了置于地基上的梁和板的受力特性和变形特性,并且将其逐步发展成一套“弹性地基”的理论。高层建筑出现以后,地基基础的问题变得更加复杂,人们对它的研究也更加深化了。例如对地基土的力学特性和变形特性的研究,地震作用的研究,地基基础和上部结构变形协调的研究,基础梁、板的受力分析等等,逐一取得了丰硕的成果。随着电子计算机的出现,计算技术的飞速发展,为上部结构和地基基础共同作用课题的研究创造了条件,并且已经取得了重要的进展。

时至今日,箱形和筏形基础的设计计算方法种类繁多,在本书以后各章中将逐一介绍。此处仅作一些简要的说明。

一、简化计算方法

简化计算方法最基本的特点是将由上部结构、地基和基础三部分构成的一个完整的静力平衡体系(图 1-2a)分割成三个部分,进行独立求解^[7]。首先假定上部结构的柱是嵌固在基础上的(1-2b),按结构力学的方法可以求出结构的内力,包括底层柱的轴力、柱脚处的弯矩和剪力。然后将这些力反向作用在基础梁或基础板上,基础梁或基础板同时承受地基反力(图 1-2c),地基反力与上部结构荷载(包括基础自重及其悬挑部分以上的土重)保持静力平衡,并假定其按直线分布,再按结构力学的方法求解基础梁或板的内力。在验算地基承载力时,假定基底压力按直线分布,即认为基础是绝对刚性的。在计算地基变形时,又把基础看做是柔性的,基底压力是均布的(图 1-2d)。显然,简化计算方法的

种种假定与整个结构体系的工作状态是不符的，它仅仅满足了总荷载与总反力的静力平衡条件，而忽视了上部结构与基础之间以及基础与地基之间的变形连续条件。因而上部结构传递给基础的荷载及地基反力的分布状态都是与实际状态有偏差的。由此也必然造成基础内力计算的偏差和地基计算的偏差。尽管简化计算方法存在这些人所共知的缺点，但许多设计人员仍然乐于使用它。原因就在于它简单、方便，而且力学概念大致清楚。在实际应用中，设计人员还会根据工程实践经验采取一些措施，例如调整或增大某些部位的地基反力，增加一些构造钢筋等等，以保证基础的安全和正常使用。

1. 筏形基础

首先将筏形基础视为一倒置的平面楼盖，地基反力按直线分布，作为荷载作用在平面楼盖上。对于平板式筏基即可按多跨连续双向板计算其内力；对于梁板式筏基，可将地基反力按 45° 线划分范围（图 1-3），阴影部分作为传递到横向肋梁上的荷载，其余部分作为传递到纵向肋梁上的荷载。然后按多跨连续梁分别计算纵向和横向肋梁的内力。这就是所谓的“倒梁法”。但是按倒梁法求出的支座反力与原柱荷载不同，两者存在一个差值。为修正这一差值，原上海市民用建筑设计院提出了“调整倒梁法”。调整的方法是将支座反力与柱荷载的差值均匀分配在该支座两侧各 $1/3$ 跨度内，作为地基反力的调整值，与原地基反力叠合成阶梯状的反力，再按此反力重新计算肋梁的内力。经过几次调整，支座反力即可与原柱荷载趋于一致。

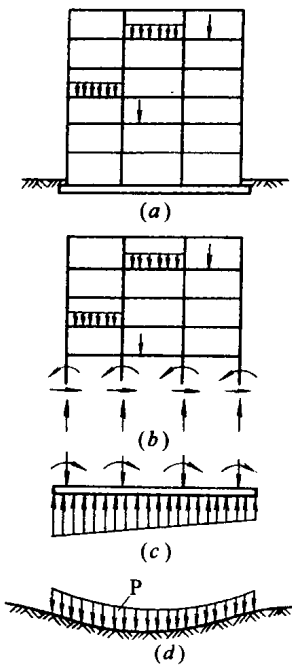


图 1-2 结构系统简化计算方法示意
(a) 结构系统简图；(b) 上部结构；
(c) 基础计算简图；
(d) 地基变形计算荷载图

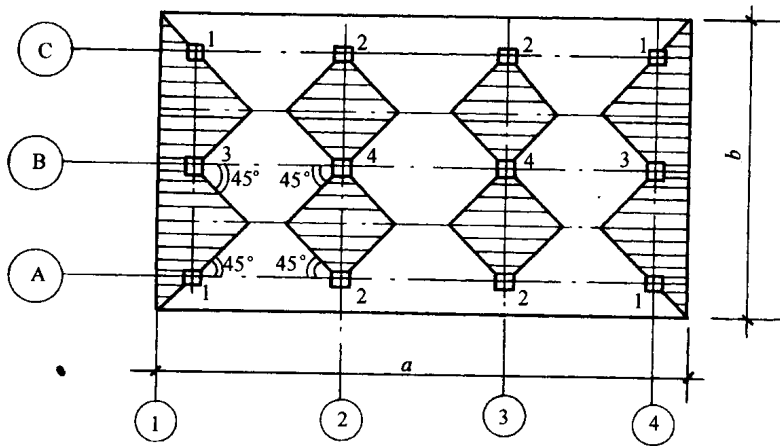


图 1-3 筏形基础肋梁上荷载的分布

更为简捷的则是静定梁法。即是将整个筏基分别按纵向和横向视为一静定梁，柱荷载及地基反力为作用在梁上的荷载，求解其内力（图 1-4）。在计算纵向梁时，应将横向的

柱列荷载叠加在一起。如图 1-4 中柱荷载 P_2 应为图 1-3 中轴线②上 2、4、2 三柱荷载之和。计算横向梁时亦按同样的方法处理。当然，这种静定梁法是比较粗糙的。这种方法处理平板式筏基较梁板式筏基效果好一些。对于墙下平板式筏基，也可取单位宽度的截条，按静定梁方法进行计算。

另外，筏形基础除进行上述抗弯计算外，其厚度还必须满足抗冲切和抗剪切要求。计算方法可按混凝土结构设计规范的相关规定进行。

2. 箱形基础

箱形基础的简化计算主要是指底板的计算。顶板按实际承受的楼面荷载进行设计。外墙按实际承受的土压力进行设计。内墙根据设计经验按构造要求配筋，也有按深梁进行复核的。

底板计算采用倒楼盖法，地基反力采用平均反力或按直线分布。或者将边跨地基反力较平均反力增加 20%，然后按单向板或双向板计算。也有将整块底板按连续板计算的。底板一般采用双层双向配筋，将计算所需的跨中钢筋全部通向支座（隔墙），支座钢筋部分通向跨中。

3. 桩箱、桩筏基础

桩箱、桩筏基础的简化计算是将箱形基础或筏形基础与桩基础分开计算。先按直线分布计算出箱形或筏形基础的基底压力，将此压力分配给桩，得到桩顶反力作用于箱形或筏形基础，计算箱形或筏形基础的内力，并验算箱基底板或筏基受桩的冲切作用。而桩则根据其承受的荷载，按桩基设计计算的有关规范、规定进行。

二、弹性地基梁、板理论分析法

弹性地基梁、板理论简而言之就是假定地基是弹性体，假定基础是置于这一弹性体上的梁或板。将基础和地基作为一个整体来研究，把它与上部结构隔断开来，上部结构仅仅作为一种荷载作用在基础上。基础底面和地基表面在受荷而变形的过程中始终是贴合的，亦即二者不仅满足静力平衡条件，而且满足变形协调条件。然后经过种种几何上和物理上的简化，用数学、力学方法求解基础和地基的内力和变形。

弹性地基梁、板是一种习惯上的称谓，因为地基并不是一种完全弹性体。所以不少专家和学者认为将它们称为基础梁或基础板更科学一些。

所谓几何上和物理上的简化，常常是将整个箱形或筏形基础简化成一根梁或一块板，或者从中取一单位宽度（常常是取 1m）的“截条”按“平面问题”进行计算。梁的长度则有“有限长”的或“无限长”的。梁的刚度又有“有限刚度”的及“绝对刚性”的假定。而最重要的简化则是地基的简化，也就是将地基简化成什么样的“地基模型”是至关重要的。因为采用不同的地基模型进行计算，基础梁、板将会得到不同的内力和变形，它不仅影响内力的大小，甚至会改变内力的正负号。

确切地说，地基模型就是地基的应力与应变关系的数学表达式，也就是地基中力与变形之间的数学关系。

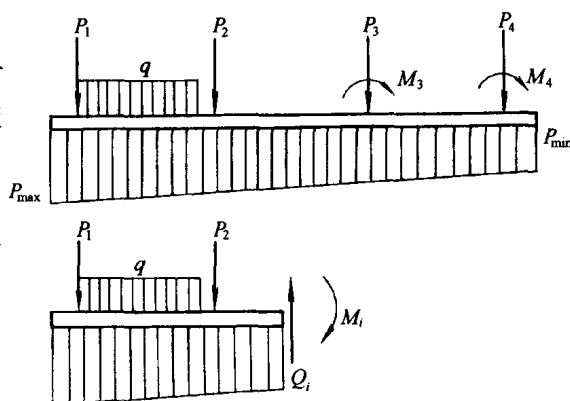


图 1-4 静定梁分析法

经典土力学论及的地基模型都是弹性模型，即应力与应变之间的关系呈直线关系（图 1-5a）。弹性模型主要有文克尔模型和半无限弹性体模型。近代土力学则主要论述弹塑性模型，将地基土的应力与应变之间的关系描述成非线性关系（图 1-5b）。比较常见的有邓肯-张模型、拉德-邓肯模型、剑桥模型等。无论弹性模型还是弹塑性模型都有丰硕的研究成果，致使地基模型达到一百种以上。但真正能进入工程实用阶段的仍然为数不多。而且在我国工程界普遍采用的还是弹性地基模型，如半无限弹性体模型和其派生出来的分层总和地基模型以及文克尔模型等。尽管如此，由于同一地基模型上的基础梁板又有许多数学解法，从而形成了弹性地基梁板理论的丰富内容。对此将在本书第 8 章中作详细的介绍，在此仅作简单的说明。

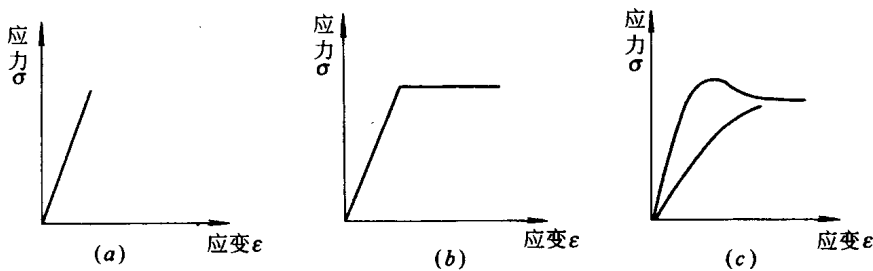


图 1-5 简化的和实际的土的应力-应变关系
(a) 理想弹性土；(b) 理想塑性土；(c) 实际土

1. 文克尔地基上的基础梁板

1867 年，文克尔 (E. Winkler) 提出一个非常著名的假定：地基表面任一点的沉降 w 与该点单位面积上所受的压力 p 成正比。其数学表达式为：

$$p = kw \quad (1-2)$$

式中 k ——基床系数，表示使地基产生单位沉降所需的单位面积土的壓力。

文克尔假定亦即文克尔模型，符合这一假定的地基亦称文克尔地基。它实质上是把地基模拟为刚性底座上一系列独立的弹簧。所以当地基表面上某一点受到压力时，只在该点产生沉降。亦即在荷载作用下，地基的变形只发生在基础底下，基础范围以外的土不产生任何变形（图 1-6）。

文克尔地基上梁的计算，首先应建立基础梁挠曲的基本微分方程。该梁的挠度为 $w(x)$ ，梁所承受的荷载为 $q(x)$ ，地基的反力为 $p(x)$ ，如图 1-7 所示。不论是否在文克尔地基上，梁的一般挠曲微分方程^[8]为：

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} = q(x) - p(x) \quad (1-3)$$

式中 E ——梁的材料弹性模量；

I ——梁的截面惯性矩。

对于文克尔地基上的梁，根据梁的挠曲与地基变形协调的原则，地基的沉降变形与梁的挠度 $w(x)$ 相等；根据静力平衡原则，地基的

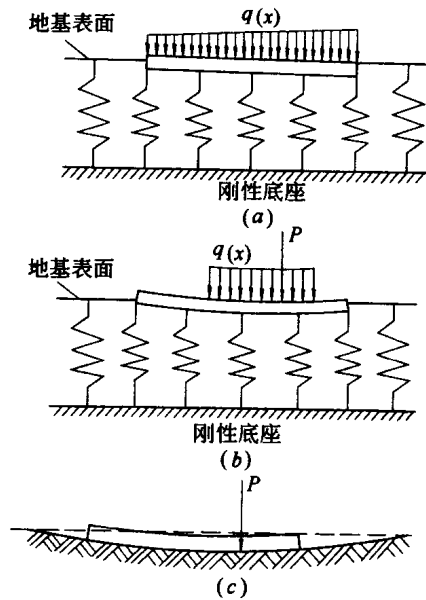


图 1-6 文克尔地基模型示意

压力与地基给予梁的反力等值, 均为 $p(x)$ 。这样一来, 按照文克尔假定的压力与沉降变形的关系, 将公式 (1-2) 代入公式 (1-3), 可得:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + kw = q(x) \quad (1-4)$$

本式即为文克尔地基上梁的基本微分方程。式中 $w(x)$ 为欲求解的未知量, E 、 I 、 $q(x)$ 、 k 为已知量。其中基床系数 k 是可以通过试验得到的。求解公式 (1-4) 的种种方法, 将在本书第 8 章中叙述。

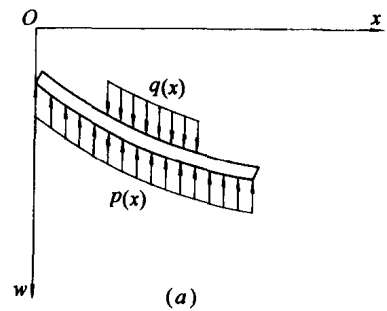


图 1-7 梁的受力图式

求得 $w(x)$ 以后, 即可求得梁的任意截面的转角 θ , 弯矩 M 和剪力 Q :

$$\theta = \frac{dw}{dx} \quad (1-5a)$$

$$M = -EI \frac{dQ}{dx} = -EI \frac{d^2 w}{dx^2} \quad (1-5b)$$

$$Q = \frac{dM}{dx} = -EI \frac{d^3 w}{dx^3} \quad (1-5c)$$

文克尔地基上的基础板, 一是取单位宽度的截条, 按基础梁的方式处理^[9]。二是按弹性薄板的弯曲问题求解, 求解的思路与基础梁相似。首先应采用一些假定, 建立基础板的受力图式, 继而根据弹性力学和文克尔假定建立基础板的基本微分方程。例如各向同性基础板的微分方程为一关于弹性曲面 $w(x, y)$ 的线性非齐次四阶偏微分方程^[9], 即

$$D \left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} \right) = q(x, y) - kw \quad (1-6)$$

式中 w ——弹性曲面挠度, 也即地基的表面沉降;

k ——基床系数;

$q(x, y)$ ——荷载;

D ——薄板截面的弯曲刚度, 其值为:

$$D = \frac{E_h h^3}{12(1 - \mu^2)} \quad (1-7)$$

式中 E_h ——薄板材料的弹性模量;

h ——板的厚度;

μ ——泊松比。

在公式 (1-6) 中, 需要求解的未知函数是板的挠度 $w(x, y)$ 。求得挠度以后, 与基础梁一样, 可以通过二次或三次偏微分求得板截面的弯矩、扭矩和剪力。

在实用上求解公式 (1-6) 一般采用近似方法或数值方法, 尤以数值方法为主, 如有限差分法或有限单元法。具体解法也将在第 8 章中叙述。

一般认为文克尔假定比较适合于基岩埋藏较浅、地基土层较薄的情况。B.A. 弗洛林认为: “当土的粘性越低、建筑物的尺寸越小、埋置深度越浅、建筑物传给地基的单位面积上的压力越大时, 采用基床系数法越有较好的根据”^[10]。

2. 半无限弹性体上的基础梁板

如前所述, 文克尔地基的变形只发生在基础底下, 基础范围以外的土不发生任何变

形。这显然与实际状况是不符合的（图 1-6c）。因而必然造成计算结果与实际状况的误差。半无限弹性体地基模型则假定地基为均质、连续、弹性的半无限体。在半无限体的表面受到荷载时，则在表面上的任一点都将产生沉降，当然离开荷载作用点越远，沉降值就越小，距离趋于无穷大，沉降就趋于零。应该说，半无限弹性体模型较文克尔模型更接近实际。

为便于学习，本章仅以半无限弹性体上的梁为例进行说明。并且把问题局限在平面应力状态，充分运用弹性理论的已有公式和结论，省去繁琐的推导，仅给读者一个明确的思路。因为不论是筏形基础还是箱形基础，本来也是允许简化为基础梁来考虑的。对于基础板，求解的思路也是一样的，而且也可以简化为平面问题来计算。求解弹性地基梁板的基本思路可以归纳如下：

- (1) 根据不同的地基模型建立地基压力与沉降关系的数学表达式；
- (2) 写出梁或板的一般挠曲微分方程，其中的挠度和反力项是欲求解的未知函数；
- (3) 根据变形协调和静力平衡条件，基础梁板的挠度即为地基的沉降，基础梁板受到的地基反力与梁板给予地基的压力等值。这样一来，即可将（1）中的地基压力代入（2）中的地基反力项，于是得到基础梁板的基本挠曲微分方程。
- (4) 运用各种数学方法（包括数值方法和有限单元法）求解基本微分方程，即可得到梁板的挠度和反力，然后根据梁板的挠度和反力求解梁板的内力。

现在回到半无限弹性体上的梁的平面应力问题。设地基为半无限弹性平面体，其厚度为单位厚度，数值设为 1，并设地基处于平面应力状态。在该平面体的表面作用集中力 P （图 1-8）。以 D 点（与力作用点的距离为 d ）为基点，则表面上任一点（与力作用点的距离为 r ）对基点的相对沉降为：

$$w = \frac{2P}{\pi E_0} \ln \frac{d}{r} \quad (1-8)$$

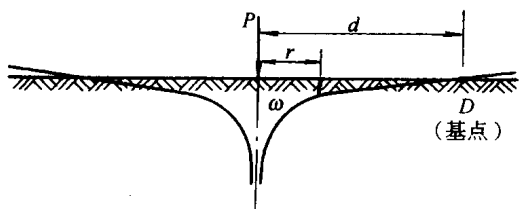


图 1-8 集中力 P 作用下地基表面的沉降

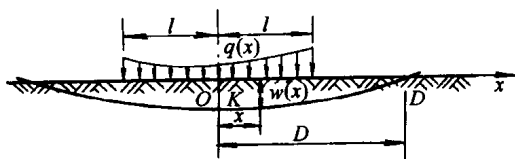


图 1-9 任意分布荷载作用下地基表面的沉降

根据公式（1-8）可以推导出在任意分布荷载作用下（图 1-9）地基表面（即半无限弹性平面体的表面）的沉降计算公式：

$$w(x) = \frac{2}{\pi E_0} \left[\int_0^{l-x} \ln \left(\frac{D-x-r}{r} \right) q(x+r) dr + \int_0^{l+x} \ln \left(\frac{D-x+r}{r} \right) q(x-r) dr \right] \quad (1-9)$$

将公式（1-9）代入梁的一般挠曲微分方程（1-3），则可得半无限弹性平面体上梁的基本方程：

$$\frac{2}{\pi E_0} \frac{d^4}{dx^4} \left[\int_0^{l-x} \ln \left(\frac{D-x-r}{r} \right) p(x+r) dr + \int_0^{l+x} \ln \left(\frac{D-x+r}{r} \right) p(x-r) dr \right]$$